

文章编号: 1000-4750(2011)02-0212-05

洪水中漂浮管道的应力分析

*王晓霖^{1,2}, 帅 健¹

(1. 中国石油大学(北京)机电工程学院, 北京 102249; 2. 中原油田博士后科研工作站, 濮阳 457001)

摘 要: 洪水对管道构成严重威胁, 可能导致管道冲出、裸露甚至大范围漂浮。管道在动水作用力、浮力、重力及岸边土体抗力的共同作用下发生空间弯曲变形。建立洪水管道力学分析模型, 考虑管-土间非线性相互作用、管道轴力和管材非线性等因素, 推导了管道空间变形曲线方程和变形协调方程, 采用迭代方法求解管道的应力与应变。基于解析方法开发计算程序, 通过算例分析了不同管道参数、洪水参数条件下管道变形与应力-应变分布。建立各算例有限元模型, 对比分析表明解析方法计算结果与有限元方法吻合较好。基于极限状态理论提出洪水管道的安全评定方法, 并对案例管道进行了安全评定。

关键词: 管道; 洪水; 应力-应变; 解析方法; 空间弯曲变形; 非线性

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A

STRESS ANALYSIS OF PIPELINE FLOATING IN FLOOD

*WANG Xiao-lin^{1,2}, SHUAI Jian¹

(1. Faculty of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Postdoctoral Scientific Research Workstation, Zhongyuan Oil Field, Puyang 457001, China)

Abstract: River-crossing pipeline is threatened by flood which could induce the pipeline being eroded and exposed, moreover, floating in a large scale. Under the combined effects of dynamic water, buoyancy, gravity and resistance of bank soil, pipeline generally presents three-dimensional bending. A mechanical analysis model is built to investigate the mechanical behaviour of pipeline exposed in flood. Taking into account the nonlinear pipe-soil interaction, the axial force and material nonlinearity of pipeline steel, the dimensional bending curve and a deformation compatibility equation of pipeline are derived. And pipeline stress and strain are calculated with an iterative solving method. Based on the proposed analytical methodology, a computer program is developed and the pipeline deformation, stress and strain are analyzed through a series of examples. Each example is subsequently investigated with the finite element method and the calculation results of the proposed method are close to that of the finite element method. Finally, a safety assessment method for pipeline in flood is proposed according to limit state theory, by which the safety of a pipeline exposed in mountain torrent is assessed.

Key words: pipeline; flood; stress and strain; analytical methodology; dimensional bending; nonlinear

长输管道穿越河流、湖泊等水文活动地域时, 如果河床变化较为剧烈或遇大型洪水, 水流冲刷可能造成管道裸露和漂浮, 尤其是对于采用传统开挖方式穿越河流的输气管道, 洪水导致管道漂浮和破坏的事故时有发生^[1-3]。漂浮管道在水流冲击作用

下会发生弯曲变形和振动疲劳损伤, 大型洪水还可能直接导致管道断裂。管道破坏不仅造成重大经济损失, 一旦油气泄漏污染水体, 还会对自然环境和社会生活带来恶劣影响。因此, 洪水成为河流、湖泊等穿跨越管道的重要安全隐患。

收稿日期: 2009-07-21; 修改日期: 2010-03-21

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划课题项目(2006BAK02B01)

作者简介: *王晓霖(1977—), 男, 河南南阳人, 博士, 从事工程力学研究(E-mail: xl_bj@126.com);

帅 健(1963—), 男, 湖北黄梅人, 教授, 博士, 从事工程力学、油气储运安全研究(E-mail: shuaij@cup.edu.cn)。

洪水对管道作用效应复杂,有学者采用数值方法分析洪水冲击管道的流场分布和不同裸露程度管道的力学反应^[4],有学者采用有限元分析洪水和河床活动对管道的影响^[5],工程中则通过水文方法计算洪水冲刷深度和范围来设计管道穿越深度。管道被冲出并浮于水中非常危险,本文分析洪水漂浮管道的受力特点,建立静力学分析模型,提出管道变形与应力的解析计算方法,开发计算程序,为洪水漂浮管道的安全评定提供理论依据和辅助工具。

1 洪水管道力学分析模型

1.1 洪水中管道载荷

如图 1 所示,假设水流均匀,流速 V 固定,洪水中的漂浮管道受到水流横向拖曳力 F_D 、惯性力 F_I 和升力 F_L 3 种动水作用力、浮力 F_f 以及管道自身和内部介质重力 W 作用(如图 1)。

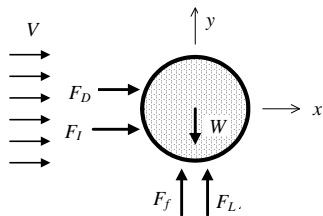


图 1 漂浮管道载荷示意图

Fig.1 Loadings on pipeline in flood

根据 Morison 方程,单位长度管道动水作用力:

$$\begin{aligned} F_D &= 0.5 r_w D C_D v_e^2, \\ F_L &= 0.5 r_w D C_L v_e^2, \\ F_I &= \frac{1}{4} r_w \pi D^2 C_M \left(\frac{dv}{dt} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

式中: r_w 为水流密度; D 为管道外径; v_e 为平均水流速度; C_D 为动水阻力系数(表 1^[6]); C_M 为动水惯性系数; dv/dt 为管道上水平水粒子加速度。

表 1 水动力系数

Table 1 Hydrodynamic coefficients

$Re/(\times 10^5)$	<0.5	0.5-1	1-2.5	2.5-5	>5
C_D	1.3	1.2	$1.53 - \frac{Re}{3 \times 10^5}$	0.7	0.7
C_L	1.5	1.0	$1.2 - \frac{Re}{3 \times 10^5}$	0.7	0.7
C_M	2	2	2	$2.5 - \frac{Re}{3 \times 10^5}$	1.5

注: Re 为水流雷诺数。

单位长度管道受到的浮力和重力分别为:

$$\begin{aligned} F_f &= \pi D^2 r_w g / 4 \\ W &= \pi [r_p D t + r_i (0.5 D - t)^2] g \end{aligned} \quad (2)$$

式中: r_p 为管材密度; t 为壁厚; r_i 为管内介质密度; g 为重力加速度。

洪水密度 r_w 计算如下^[7]:

$$r_w = r_o (1 - S_v) + r_s S_v \quad (3)$$

式中, r_o 为单位体积洪水和沙的总密度; r_s 为单位洪水中的沙密度; S_v 为体积比含沙量。

1.2 力学分析模型

工程中管道通常垂直穿越河床,管道冲出后,按作用方向将管道所荷载荷分为两类:一是水平(沿流速方向)水流拖曳力;二是竖直方向的浮力、升力和重力。管道因承受两个方向上的作用力而呈现水平和竖向组合弯曲变形。两侧堤岸内埋管为抵抗弯曲变形,受到相反方向的土体抗力及沿管道轴向的土体摩擦力作用。因此,洪水作用下的管道表现为复杂的空间受力形式。为便于求解,分别在竖直面和沿流速方向的水平面内对管道进行分析。

建立如图 2 所示水平面(xz 平面)内管道力学分析模型。水中管段 BD 受动水作用力 q_{wz} 作用; AB 段、 AA' 段位于堤岸内,受土体抗力和管土间轴向摩擦力 f 作用。管土间横向相互作用具有非线性特点,即当管土相对位移达某一值后,土弹簧屈服,管土横向相互作用力恒定。对于屈服段 AB ,管段受均布土体极限抗力 q_{uz} 作用, AA' 段管土间横向作用力 $q_z(x)$ 为线弹性,可视为弹性地基上的梁。

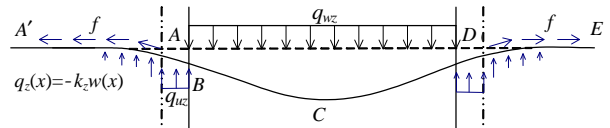


图 2 洪水管道力学分析模型

Fig.2 Analysis model for pipeline in flood

2 解析计算方法

2.1 水平面内管道变形曲线

在不同的工况条件下,图 2 分析模型中屈服段 AB 并不一定完全存在。当洪水对管道载荷较小时,堤岸中管土横向作用未进入屈服状态而处于弹性阶段。此时,将堤岸内管道视为在 B 点受集中载荷和力偶作用的半无限长梁(图 3),采用弹性地基梁理论分析。

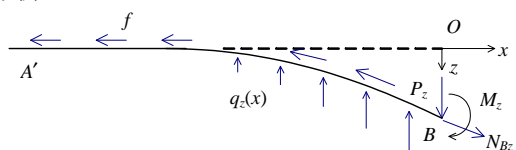


图 3 $A'B$ 段管道分析模型示意图

Fig.3 Analysis model for pipeline segment $A'B$

由弹性地基梁理论^[8], $A'B$ 段管道变形方程为:

$$w_z(x) = \frac{e^{I_z x}}{2EI_z^3} [P_z \cos I_z x + M_z I_z (\cos I_z x + \sin I_z x)] \quad (4)$$

式中: $I_z = \sqrt{k_z/4EI}$; k_z 为横向土弹簧刚度^[9]; E 为管材弹性模量, 取值为 Ramberg-Osgood 本构模型中的初始弹性模量; I 为管道截面惯性矩。

则 B 点挠度和转角分别为:

$$w_{Bz} = \frac{P_z + M_z I_z}{2EI_z^3}, \quad q_{Bz} = \frac{P_z + 2M_z I_z}{2EI_z^2} \quad (5)$$

设 BD 段管道变形曲线为:

$$v_z(x) = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e \quad (6)$$

如图 4, 由边界条件: $v_z(0) = w_{Bz}$, $v_z(L) = 0$, $v'_z(0) = q_{Bz}$, $v'_z(L) = -q_{Bz}$, $v_z(L/2) = w_{Bz} + \Delta_z$, 得:

$$v_z(x) = a(x^4 - 2Lx^3 + L^2x^2) - \frac{q_{Bz}}{L}x^2 + q_{Bz}x + w_{Bz} \quad (7)$$

式中: $a = \frac{16}{L^3} \left(\frac{\Delta_z}{L} - \frac{q_{Bz}}{4} \right)$; L 为洪水中管段长度。

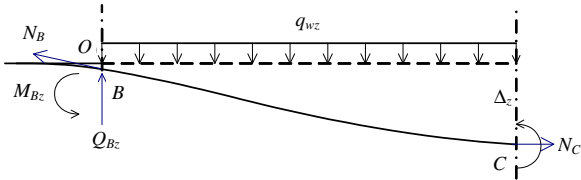


图 4 BC 管段分析模型示意

Fig.4 Analysis model for pipeline psegment AB

B 点弯矩和剪力:

$$M_{Bz} = -EIv''(0) = -2EI(aL^2 - q_{Bz}/L),$$

$$Q_{Bz} = -EIv'''(0) = 12aEL. \quad (8)$$

由 B 点弯矩、剪力连续条件得:

$$q_{Bz} = \frac{32(I_z L + 3)\Delta_z}{L(I_z L + 4)(I_z L + 6)},$$

$$a = \frac{16I_z(I_z L + 2)\Delta_z}{L^3(I_z L + 4)(I_z L + 6)}. \quad (9)$$

根据上述方法, 给定 Δ_z 即可确定管土横向无屈服段时管道变形曲线。下面讨论管土横向作用存在屈服段 AB 的情况下, 管道变形曲线求解方法。

图 3 中, 当 B 点挠度大于管土间横向土弹簧屈服位移 ($w_{Bz} > z_u$) 时, AB 段管土作用屈服。此时 $A'B$ 段管道力受力见图 2。A 为管土横向作用屈服点, $A'A$ 段视为受集中载荷和弯矩作用的弹性地基梁, 有:

$$w_{Az} = \frac{P'_z + M'_z I_z}{2EI_z^3} = z_u, \quad q_{Az} = \frac{P'_z + 2M'_z I_z}{2EI_z^2} \quad (10)$$

按前文分析方法, 计算图 2 中 BCD 段管道变

形曲线, B 点弯矩和转角由式(8)和式(9)确定。由 B 点弯矩、剪力连续条件得:

$$q_{Bz} = \frac{2I_z^3(L_{Cz} + L)^3 z_u - 96\Delta_z}{(L_{Cz} + L)[I_z^2(L_{Cz} + L)^2 - 24]},$$

$$a = \frac{2I_z^2(L_{Cz} + L)[I_z(L_{Cz} + L) + 3]z_u}{1 + I_z(L_{Cz} + L)[I_z(L_{Cz} + L) + 6]}. \quad (11)$$

式中, L_{Cz} 为屈服段 AB 沿在 x 轴投影长度(当 Δ_z 确定后, 利用该二式即可确定 L_{Cz})。

采用相同方法, 在 Δ_y 给定的前提下, 可以确定管道在竖直平面内的变形曲线 $w_y(x)$ 和 $v_y(x)$ 。

2.2 变形协调方程

忽略堤岸中弹性地基梁管段弯曲变形, 设其受均布等效轴向摩擦力, 则 AB 轴向力的平衡方程:

$$N_B = fL_{AB} \quad (12)$$

式中: L_{AB} 为有效计算长度; f 为等效摩擦强度, 由轴向土弹簧刚度确定^[9]:

$$f_u = \pi Dk_s c_s + \frac{1}{2} \pi D h_e g (1 + K_0) \tan \delta \quad (13)$$

式中: k_s 为粘合系数; c 为回填土内聚系数; h_e 为地面到管道中线距离; g 为回填土容重; K_0 为静土压力系数; δ 为管土界面摩擦角。

则 AB 段内任一点的轴心应力为:

$$s_a = (N_B - fx)/A \quad (14)$$

式中, A 为管壁横截面积。

由 Ramberg-Osgood 本构模型计算轴心应变:

$$e_a = \frac{s_a}{E} \left[1 + \frac{n}{1+r} \left(\frac{s_a}{s_s} \right)^r \right] \quad (15)$$

式中: E 为管材初始弹性模量; s_s 为管材屈服强度; r 、 n 为 Ramberg-Osgood 参数。

对式(15)在 AB 内积分, 得到管段物理伸长量:

$$\Delta e_1 = \frac{N_B^2}{fEA} \left[\frac{1}{2} + \frac{n}{(1+r)(2+r)} \left(\frac{N_B}{AS_s} \right)^r \right] \quad (16)$$

BC 段管道任一点轴力为:

$$N = \frac{N_{Bz} \cos q_{Bz}}{\cos q_z \cos q_y} \quad (17)$$

式中: q_z 和 q_y 为该点在水平和竖直面内的转角。

将 N 代入 Ramberg-Osgood 本构方程, 积分得到 BC 段的物理伸长量:

$$e_2 = \int_0^{L/2} \frac{N}{EA} \left[1 + \frac{n}{(1+r)} \left(\frac{N}{AS_s} \right)^r \right] \sqrt{1 + v_z'^2 + v_y'^2} dx \quad (18)$$

管道几何伸长量为:

$$\Delta l = \int_0^{-L_{AA'}} \sqrt{1+w_z'^2+w_y'^2} dx + \int_0^{L/2} \sqrt{1+v_z'^2+v_y'^2} dx - L_{AA'} - \frac{L}{2} \quad (19)$$

管道物理伸长与几何伸长具有以下协调关系：

$$\Delta l = \Delta e_1 + \Delta e_2 \quad (20)$$

BC 段在 z 方向力的平衡方程：

$$N_B \sin q_{Bz} + Q_{Bz} - 0.5q_{wz} L = 0 \quad (21)$$

联立式(20)和式(21)，赋予 N_B 初始值，迭代求解变形协调方程，即可确定管道变形曲线和内力。

根据计算结果，当 B 点水平或竖向位移大于横向或竖向土弹簧屈服位移时，应采用管土屈服段分析方法求解。此时，弹性地基梁部分 AA' 计算方法不变，其物理伸长量计算时，以 N_A 替换式(16)中 N_B 。由 AB 段、BC 段 x 轴方向力的平衡条件，得到 AB 段及 BC 段内任一点的轴力：

$$N = \begin{cases} \frac{N_{Az} \cos q_{Az} + f(L_C + x)}{\cos q_z \cos q_y}, & -L_C < x \leq 0 \\ \frac{N_{Az} \cos q_{Az} + f L_C}{\cos q_z \cos q_y}, & 0 < x \leq L/2 \end{cases} \quad (22)$$

采用前文方法求解管道变形的曲线和内力。

2.3 应力-应变计算

将管道应变分解为轴心应变和弯曲应变两个分量。轴心应变 e_a 由上述变形协调方程求解，弯曲应变则由管道变形确定：

$$e_b = \frac{D}{2R} \quad (23)$$

式中：R 为管道曲率半径，由空间向量法计算：

$$\frac{1}{R} = \frac{\sqrt{v_y''^2 + (v_y'v_z' - v_z'y_z'')^2 + v_z''^2}}{(v_y'^2 + v_z'^2)^{3/2}} \quad (24)$$

管壁最大轴向应变为：

$$e = e_a + e_b \quad (25)$$

由 Ramberg-Osgood 本构模型可计算轴向应力。

工程中，管道变形、内压和温差等工况往往同时存在，管道应力更加复杂。为了方便工程应用，采用简化方法将内压和温度引起的轴向应力累加到上述计算结果，估算多工况条件下的管道应力。

3 算例分析

3.1 解析方法验证

基于本文算法编制程序 PFA，通过算例(表 2)分析洪水漂浮管道的力学反应。算例中管道均垂直穿越，平均水深 3m。同时，为了验证本文方法，采用 ABAQUS/Aqua 模块建立算例有限元(FEA)模型。Aqua 提供浮力载荷方式，采用 Morison 方程计

算管道所受动水作用力^[10]。管道采用弯管单元 Elbow31，管材采用 Ramberg-Osgood 本构模型，模型长度取 20 倍穿越宽度。采用管土作用单元 PSI，通过轴向、水平和竖向非线性土弹簧^[9]描述管土间的作用关系。

表 2 算例参数

算例参数	A1/A2/A3	B1/B2/B3	C1/C2/C3
穿越距离/m	60	80	60/80/100
洪水流速/(m/s)	2/3/4	3	4
洪水含沙量/(kg/m ³)	0	0/200/400	300
管径×壁厚/mm	660×8	812×10	1016×14
介质密度/(kg/m ³)	0	850	0
管材型号	X60	X65	X70
R-O 模型 s_y /MPa	413	453	517
参数 $r \times n$	12×10	14.5×8	16.6×5.5

算例管道在最大位移处(图 2 中 C 点)管道横向位移和轴向应变、岸边(图 2 中 B 点)管道轴向应变和应力对比见图 5。式(1)表明，洪水流速和密度是影响动水作用力的主要因素，算例 A1/A2/A3 管道横向变形、应力、应变随水流速增加而增加，算例 B1/B2/B3 计算结果随洪水密度增加而增加。算例 C1/C2/C3，穿越距离越大，洪水中漂浮管段越长，管道最大横向位移和轴向应力-应变也越大，即穿越距离对管道拉弯变形效应影响显著。对比表明，本文解析方法的计算结果与有限元方法吻合较好。

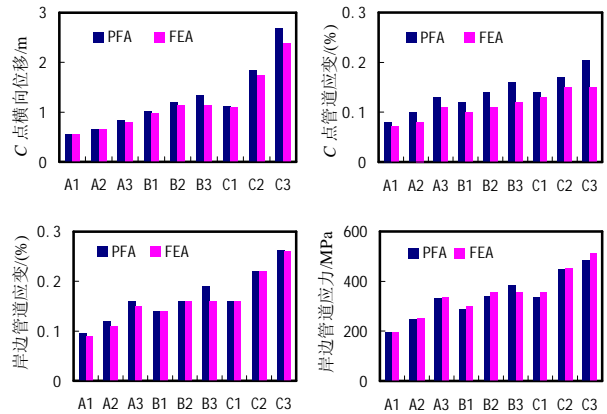


图 5 计算结果对比

Fig.5 Comparison results of PFA and FEA

3.2 洪水管道的安全评定

分析表明，洪水中管道因承受横向载荷而主要表现为拉弯变形。这种条件下，管道可能因轴向高应变而发生塑性失稳或拉断等失效模式^[11]，特别是当管壁存在(焊接)缺陷时，拉应变达到或超过极限值，可能导致管道断裂。因此，基于极限状态理论采用拉伸应变评定洪水管道的安全状态^[12]：

$$e_{ef} \leq f_{et} e_t^{crit} \quad (26)$$

式中： e_{ef} 为纵向或环向因子化拉伸应变； f_{et} 为拉伸应变阻力因子(可取 0.7)； e_t^{crit} 为管壁或焊接部件拉伸极限应变(应由材料试验确定，缺乏具体信息时 CSA Z662-03 建议取 0.75%)。

针对某山洪事故管道，采用本文方法计算管道轴向应变，评定管道安全状态。管道埋深 1.2m/s，洪水含沙量 200kg/m³，其他参数同算例 A1。情况 1：山洪流速 3.5m/s，改变漂浮段长度；情况 2：漂浮段长 80m，改变流速。计算结果如图 6，随漂浮段增长，管道轴向应变增大，漂浮段达 200m 时，计算应变 0.546%，大于拉伸应变极限 0.525%，若管体存在缺陷则有断裂危险。漂浮段超过 100m 后，水平面内管土间出现屈服段。对于情况 2，随流速增加，管道轴向应变增大，流速达历史峰值(6m/s)时，轴向应变仍小于拉伸应变极限，管道安全。与有限元对比表明，解析方法计算结果较为理想。

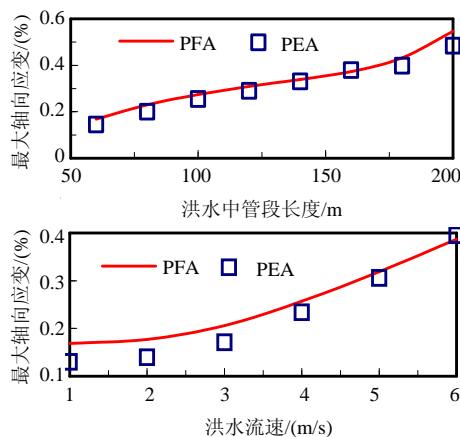


图 6 管道轴向应变计算结果

Fig.6 Results of pipeline longitudinal strains

4 结论

(1) 分析了洪水漂浮管道的载荷特点，考虑堤岸内管-土间的相互作用以及管道的空间变形，建立了管道力学分析模型和解析计算方法。

(2) 推导了空间变形管道几何伸长和物理伸长的变形协调方程，迭代求解应力-应变。解析方法考虑了管土非线性相互作用和轴力对变形的影响，比较符合实际情况。管材采用 Ramberg-Osgood 本构模型，适于管道弹塑性变形分析。

(3) 基于解析方法，编制洪水管道分析程序，通过算例，计算了不同管道参数、洪水参数条件下管道变形曲线和应力-应变分布。建立了洪水管道有限元模型，对比验证了解析方法的可靠性。

(4) 根据极限状态理论，建立了基于应变的洪水管道安全评定方法，分析了漂浮段长度和洪水流速对管道失效的影响，并对案例管道进行安全评定和极限状态分析。

参考文献:

- [1] 张俊义, 杜景水. 洪水造成管道断裂的事故分析[J]. 油气储运, 2000, 19(1): 16-19.
Zhang Junyi, Du Jingshui. Analysis on the pipeline rupture induced by flood [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2000, 19(1): 16-19. (in Chinese)
- [2] O'Donnell H W. Investigation of flood induced pipeline failures on lower San Jacinto River [C]. Proceedings of the Pipeline Division Specialty Conference. New York, United States, ASME, 2005.
- [3] 秦毅, 钱善琪, 王冰怀. 靖西天然气管道穿越段的断裂分析[J]. 油气储运, 2001, 20(5): 20-22.
Qin Yi, Qian Shanqi, Wang Binghui. Study on causes of the '99.7' crossing pipeline accident in Fuxian county [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2001, 20(5): 20-22. (in Chinese)
- [4] 张乐天, 刘扬, 魏立新. 洪水冲击管道的模拟分析[J]. 管道技术与设备, 2006(2): 11-17.
Zhang Letian, Liu Yang, Wei Lixin. Simulation and analysis of impacted pipe [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2006(2): 11-17. (in Chinese)
- [5] Song B, Cheng J J R, Chan D H, Zhou J. Numerical simulation of stress relief of buried pipeline at Pembina river crossing [C]. Proceedings of the ASME International Pipeline Conference 2006. New York, United States, ASME, 2007.
- [6] 帅健, 于桂杰. 管道及储罐强度设计[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
Shuai Jian, Yu Guijie. Strength design of pipeline & storage tank [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [7] 梁志勇, 匡尚富, 王兆印. 高含沙洪水冲刷规律的探讨[J]. 泥沙研究, 1999(6): 68-73.
Liang Zhiyong, Kuang Shangfu, Wang Zhaoyin. Scour rate of hyper concentrated flow [J]. Journal of Sediment Research, 1999(6): 68-73. (in Chinese)
- [8] 高大钊. 土力学与基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
Gao Dazhao. Soil mechanics and foundation engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese)
- [9] American lifelines alliance. Guideline for the design of buried steel pipeline [R]. ASCE, United States, 2001.
- [10] ABAQUS Inc. Abaqus analysis user's manual Volume IV: Element [M]. ABAQUS Inc, 2004.
- [11] Shinohara Y, Hara T, Tsuru E. Development of a high strength steel line pipe for strain-based design applications [C]. Proceedings of the 17th International Offshore and Polar Engineering Conference 2007. Cupertino, United States: ISOPE, 2007.
- [12] CSA Z662-07, Oil and gas pipeline systems [S]. Ontario, Canada: Canadian Standards Association, 2007.